

Sistem Proteksi Arus Bocor dan Pemantauan Konsumsi Energi Listrik dengan Sensor PZEM-004T pada Instalasi Listrik Tegangan 220V

Hafizh Atsal Febriyanto¹, Umar¹

¹Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. A. Yani Tromol Pos 1, Pabelan, Kartasura, Sukoharjo, Indonesia

 Email korespondensi: febriyantohafizhatsal@gmail.com

Abstrak. Penggunaan peralatan listrik rumah tangga yang terus meningkat di Indonesia memicu perlunya sistem yang mampu memantau konsumsi energi sekaligus memberikan perlindungan terhadap risiko kebocoran arus listrik. Kebocoran arus dapat terjadi akibat kerusakan isolasi kabel atau peralatan listrik yang bermasalah, yang berpotensi menyebabkan kecelakaan seperti sengatan listrik atau bahkan kebakaran. Oleh karena itu, diperlukan sistem proteksi arus bocor sekaligus pemantauan energi listrik berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dapat memberikan keamanan serta kemudahan dalam memantau penggunaan energi listrik. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem proteksi arus bocor dan pemantauan konsumsi energi listrik pada instalasi tegangan 220V menggunakan dua buah sensor PZEM-004T dan mikrokontroler ESP32. Sensor pertama digunakan untuk memantau arus pada kabel fasa, sedangkan sensor kedua untuk kabel netral. Sistem ini memanfaatkan prinsip perbandingan arus fasa dan netral, di mana jika terjadi selisih arus melebihi ambang batas 30mA sesuai standar PUIL 2011, maka sistem akan memutus aliran listrik secara otomatis menggunakan relay Solid State Relay (SSR). Selain itu, sistem ini juga dapat memantau tegangan, arus, daya, faktor daya, energi listrik, dan estimasi biaya yang dikonsumsi, yang ditampilkan melalui LCD 20x4 dan *web server*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja dengan baik dan akurat. Sistem proteksi arus bocor berhasil memutus aliran listrik saat terjadi arus bocor melebihi batas aman, dengan simulasi menggunakan resistor sebagai pengganti tahanan tubuh manusia. Sistem monitoring konsumsi energi juga menunjukkan akurasi yang tinggi, dengan rata-rata *error* pengukuran daya sebesar 1,31% dan energi sebesar 1,45%. Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan keselamatan instalasi listrik rumah tangga sekaligus memberikan informasi yang akurat terkait konsumsi energi listrik, sehingga pengguna dapat lebih hemat dan waspada terhadap potensi bahaya kebocoran arus listrik.



Kata kunci: ESP 32; konsumsi energi listrik; *Internet of Things*; proteksi arus bocor; PZEM-004T

PENDAHULUAN

Penyumbang terbesar dalam penggunaan listrik di Indonesia adalah konsumsi pada kebutuhan peralatan rumah tangga. Contohnya seperti kulkas, televisi, dispenser, AC, *rice cooker*, dan lampu. Penggunaan bergantung pada berapa banyak peralatan listrik yang digunakan dan lama dalam penggunaannya semakin banyak dari jumlah alat yang digunakan maka akan menambah dari beban listrik dan bertambahnya biaya tagihan listrik [1]. Untuk mengetahui dari besar penggunaan listrik menggunakan alat yang disebut KWH Meter yang terpasang pada setiap pelanggan listrik oleh PLN [2]. Cara yang dilakukan PLN dalam mengumpulkan data informasi penggunaan energi listrik pada KWH Meter berupa mendatangkan petugas yang akan mencatat langsung dari penggunaan energi listrik tiap bulannya. Untuk penggunaan Kwh Meter yang tidak terjangkau langsung oleh petugas lapangan maka PLN akan menyimpulkan dari data rata-rata penggunaan energi listrik harian dari tiap bulan sebelumnya [3].

KWH Meter, jika dilihat dari cara kerjanya, terbagi menjadi dua jenis yaitu KWH Meter Analog dan KWH Meter Digital. KWH Meter Analog merupakan perangkat pengukur konsumsi energi listrik yang beroperasi menggunakan prinsip induksi medan magnet. Sementara itu, KWH Meter Digital memiliki fungsi utama yang sama, yaitu mengukur penggunaan energi atau daya listrik dalam satuan waktu. Perbedaannya, KWH Meter Digital tidak menggunakan prinsip induksi, melainkan menggunakan sistem elektronik dengan program khusus yang tertanam di dalam mikrokontroler untuk melakukan pengukuran secara digital [4].

Biaya yang bertambah juga dapat berakibat dari adanya arus bocor pada sistem instalasi. Kebocorana arus ini juga dapat berakibat fatal bahkan kecelakaan sengatan listrik pada manusia. Kebocoran listrik bisa terjadi karena arus listrik dari kawat fasa (yang membawa tegangan) mengalir ke tanah. Hal ini biasanya disebabkan oleh kerusakan isolasi akibat kualitas instalasi kabel yang kurang baik atau terdapat peralatan listrik yang digunakan mengalami gangguan [5].

Kecelakaan akibat sengatan arus listrik yang diakibatkan dari kebocoran arus listrik pada instalasi listrik pada rumah tangga merupakan hal yang menakutkan. Akibat yang ditimbulkan dari sengatan arus listrik ini akan berpengaruh pada manusia saat bersentuhan. Badan manusia secara tidak langsung merupakan tahanan yang tidak linier [6]. Adapun faktor – faktor yang menentukan dari tingkat keseriusan sengatan arus listrik pada tubuh manusia, yaitu besar arus yang mengalir ke tubuh dengan besar arus



berdasarkan dari tegangan dan tahanan tubuh manusia, dan lama waktu sengatan listrik yang mengalir dalam tubuh sangat berpengaruh terhadap kefatalan yang dialami [7].

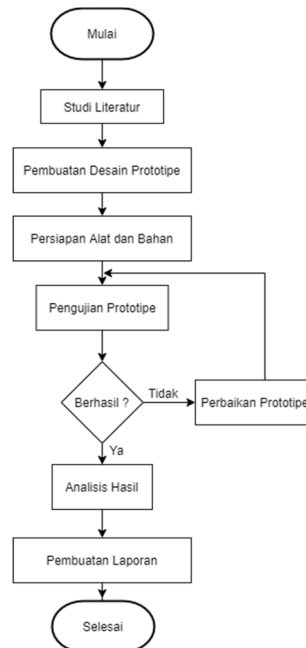
Tahanan tubuh manusia dengan kontak langsung terhadap kulit memiliki rentang nilai bervariasi dari 1000 k Ω untuk kulit kering dan 100 Ω untuk kulit basah. Nilai tahanan internal tubuh manusia sendiri antara 100 – 500 Ω [8]. Kemampuan tubuh manusia dalam tahanan terhadap arus yang mengalir ke tubuh memiliki batasan dari besar dan lamanya waktu arus yang mengalir hingga batas yang telah ditentukan. Sesuai dengan peraturan PUIL (Persyaratan Umum Instalasi Listrik) 2011 poin 415.1. disebutkan bahwa nilai arus ambang batas yang aman bagi manusia dengan sentuh langsung yaitu sebesar 30mA. Hal ini sesuai dengan penelitian dalam IEC/TS 60479-1 [9].

Sistem proteksi adalah sistem pengamanan yang difungsikan untuk dapat mencegah atau membatasi dari adanya kerusakan yang terjadi akibat gangguan dan menjaga dari penyaluran tenaga listrik untuk dapat memutus saat terjadi gangguan pada sistem jaringan transmisi [10]. Untuk zaman saat ini penggunaan gawai sebagai salah satu teknologi yang paling banyak digunakan, pengaplikasian pemantauan data berbasis mikrokontroler yang terintegrasi dengan *Internet of Things* (IoT) melalui jaringan internet merupakan salah satu inovasi yang akan sangat membantu dan memudahkan dalam pemantauan data secara jarak jauh [11].

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem proteksi dan pembacaan konsumsi energi listrik dengan IoT ini akan dapat mengumpulkan data berupa data tegangan, arus, daya, frekuensi, dan biaya yang dikonsumsi dalam penggunaannya. Sehingga, pelanggan akan dapat memantau penggunaan energi listrik dan mampu melindungi sengatan listrik dari arus bocor pada instalasi dengan memutus aliran listrik saat terjadi gangguan. Dalam penerapannya akan menggunakan sensor tegangan PZEM-004T. Pada penelitian ini, peneliti akan menggunakan *web server* sebagai server dan untuk memonitoring nilai yang dihasilkan oleh sensor pada sistem yang dikirim menggunakan mikrokontroler ESP32 melalui jaringan internet.



METODE



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Pembuatan Tugas Akhir ini berupa sistem proteksi arus bocor dan monitoring konsumsi energi listrik menerapkan metode yang tertera pada Gambar 1 yaitu menggunakan metode studi literatur dari mengumpulkan dan mengkaji berbagai sumber lalu pembuatan dan pemilihan dari alat dan sensor yang digunakan untuk membuat rancangan sistem dapat berjalan dengan baik. Pengujian serta pengambilan data sistem ini akan dilakukan pada instalasi rumah dengan menggunakan beberapa resistor sebagai uji coba pengganti tahanan tubuh pada manusia.

Persiapan Alat dan Bahan

Rancang bangun sistem proteksi dan pemantauan energi listrik menggunakan sensor ini dapat menjadi sistem alternatif untuk pengamanan instalasi listrik rumah. Sistem yang dibuat ini akan dapat menghitung dari besar tegangan, arus, dan energi yang dipakai serta memutus aliran listrik. Alat dan bahan pembuatan sistem ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan Bahan

Alat dan Bahan	Jumlah
ESP 32	1
PZEM-004T	2
relay SSR	1
Stepdown	1
Power supply	1

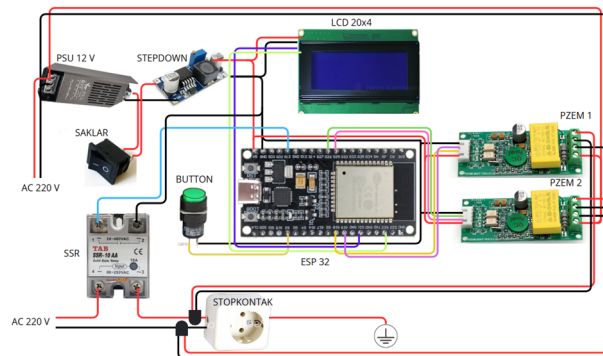


Push button	1
LCD 20 x 4	1
PCB	1
Stopkontak	1
Box	1
ESP 32	1

Selain alat dan bahan pada Tabel 1, peneliti juga menggunakan beberapa perangkat lunak/*software* dalam proses pembuatann alatnya, diantaranya Arduino Ide untuk membuat *script* program, Easy Eda untuk pembuatan *schematic* dan *layout* PCB.

Perancangan Sistem

Sistem alat ini terdiri dari saklar, button, dua buah sensor PZEM-004T, ESP32, relay SSR, LCD 20x4, serta beberapa komponen pendukung lainnya. Saklar dan button digunakan untuk mematikan dan mereset dari sistem. Penggunaan sensor PZEM-004T ini akan mengukur dari nilai arus pada kabel fasa dan netral untuk membandingkan nilai dikeduanya. ESP32 berfungsi sebagai otak dari sistem yang mengolah data sensor dan kendali penuh atas kerja sistem. Relay SSR digunakan sebagai pemutus instalasi listrik Ketika terjadi perbedaan nilai arus yang melewati ambang batas aman. LCD digunakan sebagai tampilan pada hardwere untuk menunjukkan dari nilai data yang dikirimkan oleh sensor. Seluruh hubungan antar komponen ditunjukkan pada Gambar 2.



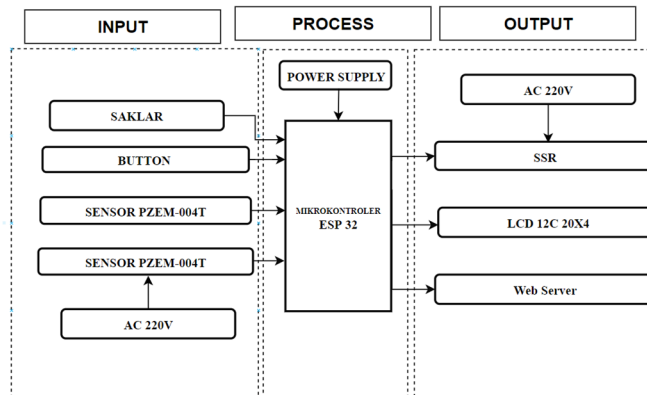
Gambar 2. *Wiring diagram* rangkaian

Gambar 2 merupakan *wiring diagram* rangkaian sistem proteksi arus bocor dan pemantauan konsumsi energi listrik. Pada diagram terdapat mikrokontroler ESP32 sebagai tempat memproses dan mengendalikan komponen yang terhubung. Terdapat dua buah sensor PZEM-004T yang digunakan sebagai pembacaan nilai arus, tegangan, daya, dan energi yang digunakan. Terdapat sistem pemutus aliran listrik menggunakan relay SSR dengan kondisi saat terdapat perbedaan nilai arus pada fasa dan netral oleh pembacaan sensor pzem-004T maka SSR akan memutuskan tegangan dan akan memberikakn informasi kebocoran. Informasi dari sensor berupa nilai arus fasa dan



netral serta nilai kebocoran akan ditampilkan pada LCD 20x4, dan untuk informasi mengenai besar konsumsi energi dan biaya akan di tampilkan melewati *web server*. Adapun penggunaan adaptor 12 V yang digunakan sebagai *supply* tegangan komponen dengan diturunkan menjadi tegangan 5 V dari stepdown.

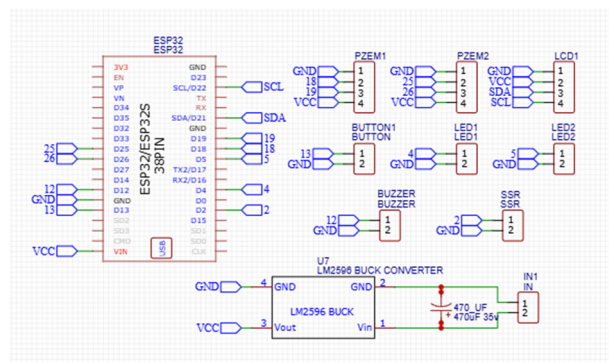
Cara kerja sistem dapat diketahui dari blok diagram pada Gambar 3.



Gambar 3. Blok Diagram Sistem

Gambar 3 menunjukkan sistem proteksi arus bocor dan monitoring konsumsi energi listrik ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu *input*, *process*, dan *output* yang menggambarkan proses berjalannya sistem yang akan dibuat ketika sistem tersebut diaktifkan. Bagian *input* merupakan tahapan untuk pengambilan informasi dari sensor yang terpasang pada sistem, sensor pada bagian input berupa sensor PZEM-004T lalu masuk untuk di proses oleh mikrokontroler lalu akan mengirimkan data pembacaan dari sensor dan ditampilkan pada antarmuka IoT juga dengan pantauan melalui LCD.

Perancangan Elektrikal



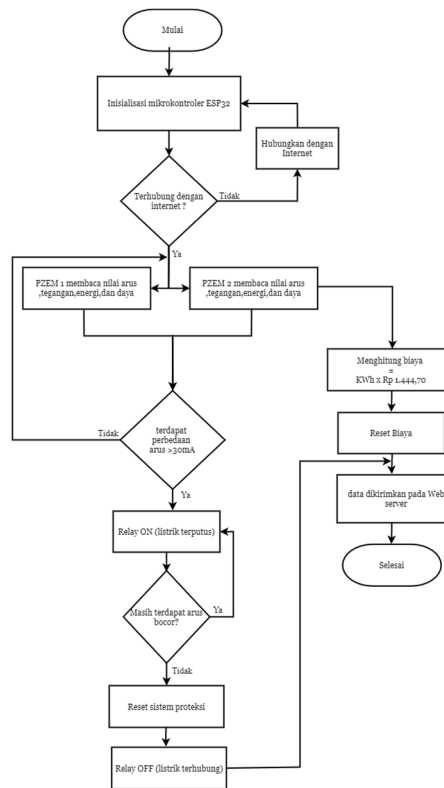
Gambar 4. Perancangan *Schematic* PCB

Rancangan *schematik* dari desain PCB pada Gambar 4 dibuat menggunakan perangkat lunak Easy Eda. Pembuatan skematik menggunakan metode label supaya lebih



terlihat rapi dan simpel. Dari pembuatan PCB untuk sensor akan dihubungkan dengan menggunakan molex untuk memudahkan dalam perawatannya.

Rancangan Perangkat Lunak



Gambar 5. *Flowchart* Sistem

Flowchart sistem pada Gambar 5 diawali dengan mulai yang menandakan sistem aktif dan menginisialisasi dari mikrokontroler ESP32, sistem akan berlanjut terhubung dengan internet lalu sensor PZEM-004T untuk mengukur arus, tegangan, daya, faktor daya, dan Kwh. Sistem akan berlanjut untuk mengukur arus pada fasa dan netral, jika terdapat perbedaan arus $>30\text{mA}$ maka sistem akan memutus dari aliran listrik. Sistem juga akan menghitung dari besar biaya listrik yang digunakan. Sistem dapat direset dengan button untuk mereset Kwh dan mereset sistem untuk kembali berjalan. Data dari sensor akan disimpan dan dikirimkan ke *web server* agar pengguna dapat memonitoring sistem melewati *software* android. Program pembuatan sistem ini dijelaskann pada Gambar 6, yang menjelaskan terkait data sensor dan inisialisasi sistem untuk dapat menjalankan sistem yang baik dan bekerja.



```

1#include <WiFi.h>
2#include <AsyncTCP.h>
3#include <ESPAsyncWebServer.h>
4
5#include <PZEM004Tv30.h>
6#include <EEPROM.h>
7#include <Wire.h>
8#include <LiquidCrystal_I2C.h>
9
10const char* ssid = "NAMA_WIFI_ANDA";
11const char* password = "PASSWORD_WIFI_ANDA";
12
13AsyncWebServer server(80);
14
15// Definisi pin untuk ESP32 38-pin
16#define PIN_RELAY 2
17#define PIN_LED_MERAH 4
18#define PIN_LED_HIJAU 5
19#define PIN_BUZZER 12
20#define PIN_TOMBOL_RESET 13
21
22// Pin sensor PZEM - menggunakan serial hardware
23#define PZEM1_RX 18 // Sensor jalur PHASE (Serial2)
24#define PZEM1_TX 19
25#define PZEM2_RX 26 // Sensor jalur NETRAL dan kWh METER (Serial1)
26#define PZEM2_TX 25
27
28// Pin I2C untuk LCD
29#define PIN_SDA 21
30#define PIN_SCL 22

```

Gambar 6. Program pada Arduino IDE

Gambar 6 menunjukkan program dari sistem proteksi arus bocor dan pemantauan konsumsi energi listrik. Inisialisasi library dan penerapan pin data yang akan digunakan disesuaikan dengan komponen dan alur kerja sistem. Sensor PZEM-004T ini akan mengukur dari nilai arus pada fasa dan netral, juga mengukur dari nilai tegangan, daya, frekuensi, factor daya, dan energi yang digunakan. Hasil data tersebut akan dikirim dan disimpan pada EEPROM yang akan ditampilkan pada LCD dan *web server*.

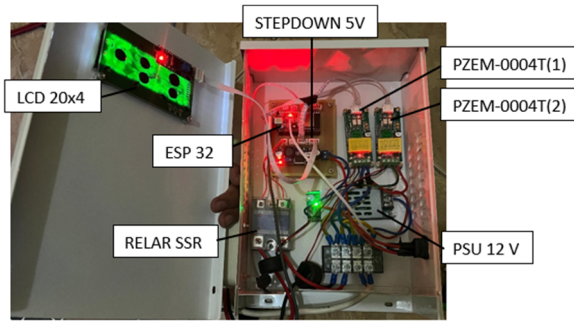


Gambar 8. Tampilan Web Server

Gambar 8 merupakan tampilan *web server* yang dapat dipantau melalui *smartphone*. Pada Gambar 8 berupa tampilan *web server* yang akan menampilkan data dari sistem proteksi dan pengukuran Energi listrik yang digunakan. Tampilan sistem proteksi akan menampilkan data arus fasa, arus netral, dan arus bocor. Untuk tampilan sistem pengukuran energi akan menampilkan data dari tegangan, arus, daya aktif, faktor daya, total energi, dan estimasi harga yang dipakai



Rancangan *Hardware*



(a)Rancangan Elektronika



(b) Tampilan depan



(c)Tampilaln samping kiri



(d) Tampilan samping kanan

Gambar 6. Rancangan *Hardware*

Rancangan elektronika pada Gambar 6.a dibuat berdasarkan desain *wiring diagram* pada Gambar 3. Pada papan PCB akan terdapat molex sebagai penghubung antara pin pada mikrokontroler dengan sensor. Dari rancangan elektronika ini ditempatkan pada sebuah box berukuran tinggi 28cm lebar 19cm kedalaman 10cm dengan tampilan depan akan terdapat sebuah LCD 20x4 untuk menampilkan dari nilai arus fasa dan netral yang terbaca. Pada sistem ini akan si *supply* menggunakan power *supply* 12 V yang akan diturunkan menjadi 5 V dengan stepdown sebagai catu daya mikrokontroler dan sensor PZEM-004T. Pada gambar 6.b merupakan tampilan alat dari depan dengan LCD 20x4, gambar 6.c dan 6.d merupakan tampilan alat tampak samping kanan dan kiri dengan terpasang stopkontak sebagai tempat untuk beban dan samping kanan terdapat saklar on off lalu tombol reset.



Pengujian Sistem

Setelah proses perancangan dan perakitan selesai, dilakukan pengujian sistem untuk memastikan semua komponen bekerja sesuai fungsinya. Pengujian bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan dari sensor dalam mendeteksi nilai arus, tegangan, daya, faktor daya, dan energi pada kabel fasa dan netral. Data hasil pengukuran tersebut akan dikirimkan ke ESP32. Jika sistem mendeteksi adanya perbedaan arus maka sistem akan memutus instalasi listrik dengan relay SSR. Untuk sistem Kwh meter akan menampilkan data dari tegangan, arus, faktor daya, daya, dan jumlah energi yang digunakan sehingga akan dapat memberikan jumlah estimasi biaya yang harus dibayarkan. Data-data hasil pengukuran tersebut akan dikirimkan melalui jaringan internet ke *web server*.

Pengambilan Data dan Analisis

Tahap ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dari sistem proteksi dan Kwh meter secara menyeluruh. Data yang telah dikumpulkan dari beberapa pengujian , berupa pengujian sensor PZEM-004T, pengujian proteksi arus bocor, pengujian pemantauan konsumsi energi listrik. Selanjutnya data-data yang telah dikumpulkan dari beberapa pengujian akan dianalisis dengan membandingkan nilai parameter yang didapatkan dengan perbandingan nilai pada alat ukur. Tujuan dari analisis ini untuk mengetahui sistem dapat bekerja sesuai yang diharapkan atau perlu ada yang ditingkatkan.

HASIL

Pengujian Pembacaan Sensor PZEM-004T

Sensor PZEM-004T yang digunakan ini merupakan sensor sensor yang dapat menampilkan data dari pengukuran listrik AC dengan akurasi yang tinggi. Pengujian akan dilakukan sebanyak 7 kali dengan dibedakan dari beban yang digunakan. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2 dan 3.

Tabel 2. Hasil pengujian sensor PZEM-004T (1)

Beban	Multimeter				LCD			
	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)	Faktor Daya	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)	Faktor Daya
TanpaBeban	0	228,3	0	0	0	227,9	0	0
Laptop	0,266	226,9	38,2	0,63	0,28	226,3	39,5	0,63
Ricecooker	0,05	228,0	11,8	0,99	0,05	227,5	12,2	0,99
Hairdrayer	1,111	217,6	240,8	1	1,13	218,0	245,1	1



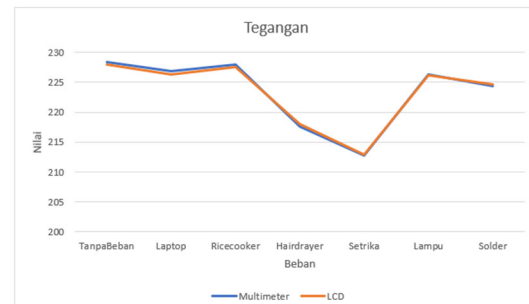
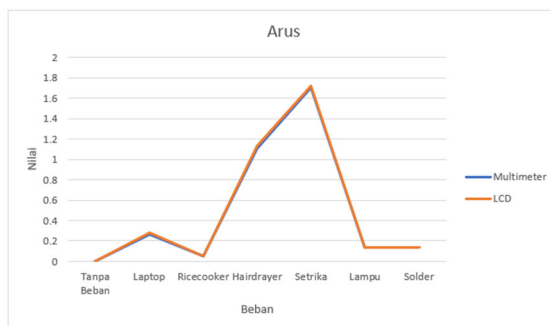
Setrika	1,703	212,7	360,6	1	1,72	212,9	365,5	1
Lampu	0,136	226,3	19,8	0,66	0,14	226,1	20,7	0,66
Solder	0,14	224,3	30,9	1	0,14	224,7	31,8	1

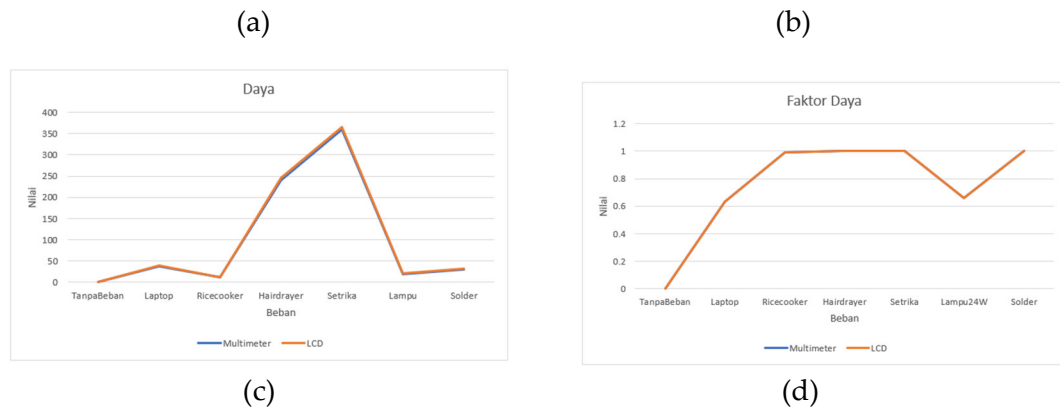
Tabel 3. Tabel Persentase *Error* (%)

Beban	Arus (%)	Tegangan (%)	Daya (%)	Faktor Daya (%)
Tanpa Beban	0	0,17	0	0
Laptop	5,2	0,26	3,40	0
Rice cooker	0	0,21	3,38	0
Hairdrayer	1,70	0,18	1,78	0
Setrika	0,99	0,09	1,35	0
Lampu	2,94	0,08	4,54	0
Solder	0	0,17	2,91	0
Rata-rata nilai <i>error</i>	1,54	0,16	2,48	0
Akurasi Pengukuran	98,46	99,48	97,52	100

Tabel 2 dan 3 merupakan hasil pengujian dari sensor PZEM-004T(1) yang menunjukkan proses pengukuran dan kinerja dari pembacaan sensor dengan pembacaan dari nilai arus, tegangan, daya, dan faktor daya. Uji pengukuran ini menggunakan beberapa beban yang dipakai terdapat pengujian tanpa beban, dengan beban laptop, rice cooker, hairdrayer, setrika, lampu, dan solder. Presentase *error* terbesar terjadi pada pengukuran beban laptop dengan perbandingan nilai arus multimeter dengan pengukuran menggunakan sensor mencapai 5,2 % dan pengukuran daya dengan *error* 3,4 Pada pengukuran tegangan memiliki rata-rata *error* 0,16% dengan akurasi 99,48%. Pada pengukuran daya memiliki rata-rata 2,48% dengan akurasi 97,52%. Pada pengukuran faktor daya memiliki rata-rata *error* 0% dengan akurasi 100%. Dari perbandingan pengukuran antara sensor dengan multimeter ini memiliki nilai akurasi yang baik.

Berdasarkan data percobaan pada Tabel 2 dan 3, maka perbandingan nilai antara alat ukur dengan sensor dapat dilihat pada Gambar 9.





Gambar 9. Grafik perbandingan (a) Arus, (b) Tegangan, (c) Daya, (d) Faktor daya

Gambar 9 merupakan grafik perbandingan antara pembacaan sensor dengan pengukuran menggunakan alat ukur yang menunjukkan tidak adanya perubahan signifikan dari grafik tersebut yang menunjukkan bahwa pengukuran dari sensor dapat bekerja dengan optimal.

Tabel 4. Hasil pengujian sensor PZEM-004T (2)

Beban	Multimeter				LCD			
	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)	Faktor Daya	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)	Faktor Daya
TanpaBeban	0	228,3	0	0	0	227,6	0	0
Laptop	0,266	226,9	38,2	0,63	0,28	226,0	39,2	0,63
Ricecooker	0,052	228,0	11,8	0,99	0,05	227,3	12,1	0,99
Hairdrayer	1,111	217,6	240,8	1	1,12	217,0	243,3	1
Setrika	1,703	212,7	360,6	1	1,71	212,6	362,9	1
Lampu	0,136	226,3	19,8	0,66	0,14	226,9	20,5	0,66
Solder	0,14	224,3	30,9	1	0,14	224,5	31,6	1

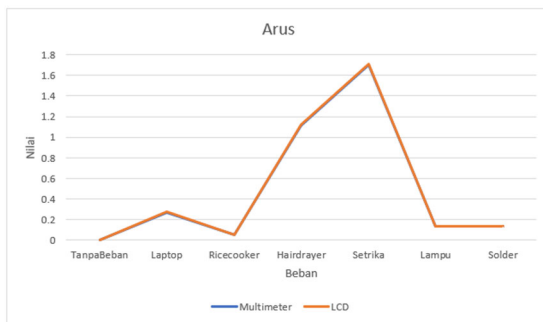
Tabel 5. Tabel persentase *Error* (%)

Beban	Arus (%)	Tegangan (%)	Daya (%)	Faktor Daya (%)
Tanpa Beban	0	0,30	0	0
Laptop	5,2	0,39	2,61	0
Rice cooker	0	0,30	2,54	0
Hairdrayer	0,81	0,27	1,03	0
Setrika	0,41	0,04	0,63	0
Lampu	2,94	0,26	3,35	0

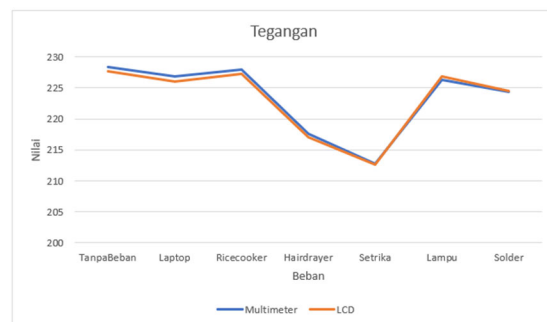


Solder	0	0,08	2,26	0
Rata-rata nilai <i>error</i>	1,33	0,23	1,77	0
Akurasi Pengukuran	98,67	99,77	98,23	100

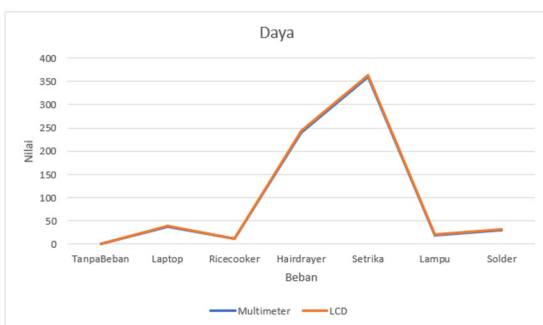
Tabel 4 dan 5 merupakan hasil pengujian dari sensor PZEM-004T(2) yang menunjukkan proses pengukuran dan kinerja dari pembacaan sensor dengan pembacaan dari nilai arus, tegangan, daya, dan faktor daya. Uji pengukuran ini menggunakan beberapa beban yang dipakai terdapat pengujian tanpa beban, dengan beban laptop, rice cooker, hairdrayer, setrika, lampu, dan solder. Presentase *error* terbesar terjadi pada pengukuran beban laptop dengan perbandingan nilai arus multimeter dengan pengukuran menggunakan sensor mencapai 5,2 % dan pengukuran daya dengan *error* 2,61 %. Pada pengukuran rata-rata *error* untuk parameter arus sebesar 1,33% dengan akurasi 98,67%. Pada pengukuran tegangan memiliki rata-rata *error* 0,23% dengan akurasi 99,77%. Pada pengukuran daya memiliki rata-rata 1,77% dengan akurasi 98,23%. Pada pengukuran faktor daya memiliki rata-rata *error* 0% dengan akurasi 100%. Dari perbandingan pengukuran antara sensor dengan multimeter ini memiliki nilai akurasi yang baik. Dari dua sensor PZEM-004T yang dicoba mendapat hasil bahwa sensor 2 ini lebih akurat dalam pengukuran nilai arus, tegangan, daya, faktor daya. Berdasarkan data percobaan pada Tabel 4 dan 5, maka perbandingan nilai antara alat ukur dengan sensor dapat dilihat pada Gambar 10.



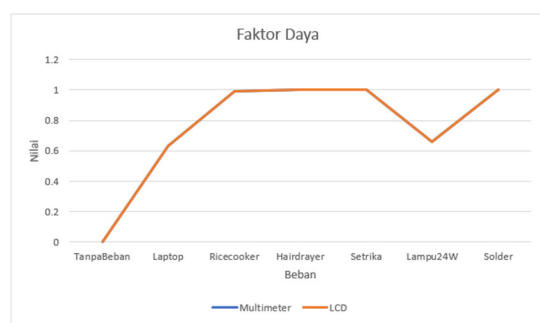
(a)



(b)



(c)



(d)



Gambar 10. Grafik perbandingan (a) Arus, (b) Tegangan, (c) Daya, (d) Faktor daya

Gambar 10 merupakan grafik perbandingan antara pembacaan sensor dengan pengukuran menggunakan alat ukur yang menunjukkan tidak adanya perubahan signifikan dari grafik tersebut yang menunjukkan bahwa pengukuran dari sensor dapat bekerja dengan optimal.

Pengujian Sistem Proteksi Arus Bocor

Pengujian sistem ini menggunakan dua buah sensor PZEM-004T yang akan mengukur arus pada kabel fasa dan netral. Pengujian ini akan menggunakan beban lampu dengan daya 24 Watt. Pengambilan sampel parameter dilakukan dengan perbandingan menggunakan resistor sebagai pengganti tahanan tubuh manusia. Batas arus yang aman dan masih dapat ditoleransi oleh tubuh manusia yaitu 30mA sesuai dengan aturan pada PUIL 415.1. Batasan arus dan opengatuhnya dapat dilihat pada Tabel 6 [7].

Tabel 6. Batasan Arus dan Pengaruhnya pada Manusia

Besar Arus	Pengaruh pada tubuh manusia
0 – 0,9 mA	Belum dirasakan pengaruhnya, tidak menimbulkan reaksi apa-apa
0,9 – 1,2 mA	Baru terasa adanya arus listrik, tetapi tidak menimbulkan akibat kejang, kontraksi atau kehilangan kontrol
1,2 – 1,6 mA	Mulai terasa seakan-akan ada yang merayap di dalam tangan
1,6 – 6,0 mA	Tangan sampai ke siku merasa kesemutan
6,0 – 8,0 mA	Tangan mulai kaku, rasa kesemutan makin bertambah
13 – 15 mA	Rasa sakit tidak tertahankan, penghantar masih dapat melepaskan dengan gaya yang besar sekali
15 – 20 mA	Otot tidak sanggup lagi melepaskan penghantar
20 – 50 mA	Dapat mengakibatkan kerusakan pada tubuh manusia
50 – 100 mA	Batas arus yang dapat menyebabkan kematian

Tabel 6 merupakan tabel batasan nilai arus dan pengaruhnya pada tubuh manusia yang dijelaskan bahwa besarnya nilai arus yang mengalir pada tubuh dari sentuhan masih dibawah 30mA.

Tabel 7. Pengujian Sistem Proteksi Arus Bocor ke Ground

Resistor (Ohm)	Hasil Pengukuran Arus (A)		Ibocor (A)	Trip
	I1 (1)	I2 (2)		
220	1,040	0,130	0,910	Trip



390	0,610	0,130	0,480	Trip
610	0,400	0,130	0,270	Trip
830	0,305	0,130	0,180	Trip
1000	0,290	0,130	0,160	Trip
1440	0,340	0,130	0,210	Trip
1830	0,340	0,130	0,210	Trip
2000	0,250	0,130	0,120	Trip
2390	0,230	0,130	0,100	Trip
2610	0,240	0,130	0,110	Trip

Keterangan simbol pada Tabel 7:

I1 : nilai arus yang terbaca pada kabel fasa sistem (Ampere).

I2 : nilai arus yang terbaca pada kabel netral sistem (Ampere).

Ibocor : nilai arus bocor yang terbaca pada sistem (Ampere).

Tabel 7 merupakan tabel percobaan arus bocor dengan resistor sebagai pengganti tubuh manusia yang dihubungkan ke ground. Dari tabel 7 semua sistem dapat bekerja normal dengan memutus aliran listrik saat terjadi perbedaan arus pada kabel fasa dan nertal sesuai dengan persamaan 4. Pada percobaan dengan resistor 220ohm nilai arus yang mengalir pada fasa akan lebih besar hingga 1,040 A dan pada kabel netral 0,130 A dengan nilai arus bocor sebesar 0,910 A. Pada percobaan dengan resistor 2610ohm arus yang mengalir pada kabel fasa lebih kecil dengan nilai 0,240 A dan pada kebel netral 0,130 A dengan nilai arus bocor 0,110A.

Tabel 8. Pengujian Sistem Proteksi Hubung Singkat

Resistor (Ohm)	Hasil Pengukuran Arus (A)		Ibocor (A)	Trip
	I1 (1)	I2 (2)		
220	0,530	0,130		0,400
390	0,480	0,130		0,350
610	0,450	0,130		0,320
830	0,420	0,130		0,290
1000	0,410	0,130		0,280
1440	0,320	0,130		0,180
1830	0,280	0,130		0,150
2000	0,260	0,130		0,130
2390	0,200	0,200		0
2610	0,200	0,200		0

Keterangan simbol pada Tabel 8:

I1 : nilai arus yang terbaca pada kabel fasa sistem (Ampere).

I2 : nilai arus yang terbaca pada kabel netral sistem (Ampere).



Ibocor : nilai arus bocor yang terbaca pada sistem (Ampere).

Tabel 8 merupakan tabel percobaan arus bocor dengan resistor sebagai pengganti tubuh manusia yang dihubungkan langsung antara kabel fasa dan netral. Dari tabel percobaan dengan resistor 220ohm nilai arus yang mengalir pada fasa akan lebih besar hingga 0,530 A dan pada kabel netral 0,130 A dengan nilai arus bocor sebesar 0,400 A dan sistem akan mendeteksi kebocoran arus sehingga sistem trip. Pada percobaan dengan resistor 2610 ohm arus yang mengalir pada kabel fasa lebih kecil dengan nilai 0,200 A dan pada kebel netral 0,200 A dengan nilai arus bocor 0,0A karena tidak adanya perbedaan nilai arus maka sistem tidak trip. Pada percobaan tersebut pada nilai resistor dibawah 2390 ohm terdapat arus bocor karena nilai ohmnya terlalu kecil sehingga nilai distribusi tidak seimbang. Pada nilai resistor diatas 2390 ohm nilai arus antara fasa dan netral memiliki nilai yang sama namun terdapat kenaikan arus karena adanya beban nyata yang terpasang langsung anara fasa dan netral.

Pengujian Sistem Pemantauan Konsumsi Energi

Pengujian sistem ini dilakukan dengan melakukan pengukuran dari menggunakan konsumsi energi. Pengukuran akan dilakukan dengan menggunakan salah satu sensor PZEM-004T yaitu sensor yang terpasang pada pin ESP 18 dan 19. Penggunaan beban yang diuji berupa lampu, laptop, solder, hairdrayer, rice cooker, setrika, kipas angin. Hasilnya akan dibandingkan dengan dengan nilai alat ukur yaitu Kwh meter. Nilai *Error* , rata-rata *Error*, dan akurasi dihitung menggunakan persamaan 1,2, dan 3, hasilnya dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Pengujian Sistem Konsumsi Energi

Beban	V1 (V)	V2 (V)	<i>Error</i> %	I1 (A)	I2 (A)	<i>Error</i> %	Pf 1 (W)	Pf 2 (W)	<i>Error</i> %
Tanpa Beban	227,6	227,2	0,17	0	0	0	0	0	0
Laptop	226,0	226,7	0,30	0,30	0,30	0	0,63	0,62	1,6
Rice cooker	227,3	228,1	0,35	0,052	0,05	4	0,99	0,99	0
Hairdrayer	219,0	219,5	0,22	1,137	1,143	0,52	1	1	0
Kipas	220,1	220,5	0,18	0,17	0,17	0	0,99	0,99	0
Lampu	227,9	227,7	0,08	0,13	0,127	2,36	0,64	0,63	1,58
Solder	224,2	224,4	0,08	0,124	0,121	2,47	1	1	0
Rata-rata nilai <i>error</i> tegangan			0,19	Rata-rata nilai <i>error</i> arus		1,33	Rata-rata nilai <i>error</i> faktor daya		0,45



Akurasi pengukuran tegangan	99,81	Akurasi pengukuran arus	98,67	Akurasi pengukuran faktor daya	99,55
-----------------------------	-------	-------------------------	-------	--------------------------------	-------

Keterangan simbol pada Tabel 9:

V1: nilai tegangan yang terbaca pada alat yang dibuat (Volt).

V2: nilai tegangan yang terbaca pada alat ukur (Volt).

I1: nilai arus yang terbaca pada alat yang dibuat (Ampere).

I2: nilai arus yang terbaca pada alat ukur (Volt).

Pf1: nilai faktor daya yang terbaca pada alat yang dibuat.

Pf2: nilai faktor daya yang terbaca pada alat ukur.

Tabel 9 merupakan pengujian dari kinerja sistem untuk dapat menghitung kebutuhan energi dari penggunaan beban. Beban yang diuji berupa tanpa beban, laptop, ricecooker, hairdrayer, kipas, lampu, dan solder. Tabel 9 berupa perbandingan dari pengujian untuk nilai dari arus tegangan dan faktor daya. Pada pengukuran tegangan nilai rata-rata *error* yaitu 0,19% dengan akurasi 99,81%. Pada pengukuran arus nilai rata-rata *error* yaitu 1,33% dengan akurasi 98,67%. Pada pengukuran faktor daya nilai rata-rata yaitu 0,45% dengan akurasi 99,55%. Nilai dari pengukuran tersebut memiliki keakuratan yang tinggi antara nilai dari sistem dengan nilai dari alat ukur.

Tabel 10. Perbandingan Daya dan Energi Sistem dari Pembacaan Sensor dengan Pengukuran

Beban	Waktu (menit)	P1 (W)	P2 (W)	<i>Error</i> (%)	E1 (Kwh)	E2 (Kwh)	<i>Error</i> (%)	Biaya
Tanpa Beban	30	0	0	0	0	0	0	0
Laptop	30	43,2	43,8	1,36	0,02	0,02	0	32
Rice cooker	30	12,1	12,3	1,62	0,153	0,160	4,37	221
Hairdrayer	30	247	251	1,59	0,125	0,125	0	360
Kipas	30	36,9	36,4	1,37	0,018	0,017	5,8	26
Lampu	30	18,8	18,4	2,17	0,009	0,009	0	13
Solder	30	26,6	26,9	1,11	0,014	0,014	0	20
Rata-rata nilai <i>Error</i> daya				1,31	Rata-rata nilai <i>Error</i> energi		1,45	
Akurasi pengukuran daya				98,69	Akurasi pengukuran energi		98,55	

Keterangan simbol pada Tabel 10:

P1: Nilai daya yang terbaca pada alat yang dibuat (Watt).



P2: nilai daya hasil dari ukur (Watt).

E1: Nilai energi yang terbaca pada alat yang dibuat (Watt).

E2: nilai energi hasil dari alat ukur. (Kwh).

Tabel 10 merupakan pengujian perbandingan antara pembacaan sensor dengan pengukuran menggunakan alat ukur. Untuk mengukur daya dan jumlah energi yang digunakan tiap beban akan diukur menggunakan Kwh meter. Pada pengukuran daya rata-rata *error* didapatkan nilai yaitu 1,31% dengan akurasi 98,69%. Pada pengukuran energi memiliki rata-rata *error* yaitu 1,45% dengan akurasi 98,55%. Penulis akan mengamati dari penggunaan konsumsi energi beban selama 30 menit. Pengukuran energi beban penulis mengukur konsumsi beban pada golongan listrik 900VA dengan untuk setiap penggunaan 1 Kwh seharga Rp. 1.444.70. Berdasarkan informasi dari Kompas.com yang mengacu pada peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 7 tahun 2024, disebutkan bahwa untuk tarif listrik kebutuhan rumah tangga dengan besar daya 1300 VA sebesar 1.444,70 [12]. Penggunaan energi dapat juga ditentukan mengunakan perhitungan melalui persamaan 5.

PEMBAHASAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem proteksi arus bocor dan pemantauan konsumsi energi listrik berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan dua sensor PZEM-004T. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini bekerja dengan sangat baik, baik dalam mendeteksi arus bocor maupun dalam melakukan monitoring konsumsi energi secara real-time. Pada dasarnya, prinsip kerja sistem mengacu pada perbandingan arus antara kabel fasa dan netral, yang apabila terdapat selisih arus melebihi batas ambang 30 mA, maka sistem akan memutuskan aliran listrik secara otomatis menggunakan relay SSR. Hal ini sesuai dengan ketentuan keselamatan yang ditetapkan dalam PUIL 2011, khususnya poin 415.1, yang menyatakan bahwa batas maksimal arus yang masih dapat ditoleransi oleh tubuh manusia adalah 30 mA.

Kinerja proteksi yang dihasilkan oleh sistem tergolong responsif dan akurat. Pada pengujian arus bocor ke ground menggunakan resistor sebagai simulasi tahanan tubuh manusia, sistem menunjukkan bahwa dalam seluruh variasi resistor (220 Ω hingga 2610 Ω), sistem mampu memutuskan aliran listrik dengan benar ketika arus bocor melebihi ambang batas. Nilai arus bocor yang terukur berada di kisaran 0,1 A hingga 0,91 A pada resistansi rendah, yang secara teoritis membahayakan tubuh manusia. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem mampu mengeksekusi proteksi secara efektif, dan bekerja sesuai dengan konsep kerja ELCB yang umum digunakan dalam sistem proteksi instalasi listrik.



Dari aspek pemantauan energi, sistem menunjukkan hasil yang sangat akurat dengan rata-rata error pengukuran daya sebesar 1,31% dan energi sebesar 1,45%. Sensor PZEM-004T terbukti mampu mengukur parameter kelistrikan seperti arus, tegangan, daya aktif, faktor daya, dan energi secara real-time. Perbandingan hasil pengukuran antara dua sensor yang digunakan dalam sistem menunjukkan bahwa sensor kedua (PZEM-004T (2)) memiliki performa pengukuran yang lebih stabil, dengan rata-rata error arus hanya sebesar 1,33% dibandingkan dengan 1,54% pada sensor pertama. Faktor-faktor yang memengaruhi perbedaan ini dapat disebabkan oleh variasi pabrikasi sensor, kalibrasi awal, dan toleransi komponen internal.

Pengujian konsumsi energi terhadap berbagai beban rumah tangga seperti laptop, rice cooker, hair dryer, solder, dan kipas angin juga menunjukkan bahwa sistem mampu mencatat penggunaan energi secara akurat dalam satuan waktu tertentu (30 menit). Perbandingan dengan alat ukur standar (KWh meter) memperkuat kevalidan hasil pengukuran sistem, yang memiliki akurasi di atas 98% untuk parameter daya dan energi. Selain itu, sistem juga mampu menghitung estimasi biaya berdasarkan tarif listrik yang berlaku, yakni Rp. 1.444,70 per KWh untuk golongan rumah tangga 900 VA, mengacu pada peraturan Menteri ESDM tahun 2024.

Integrasi sistem monitoring berbasis IoT menjadi nilai tambah dari sistem yang dirancang. Dengan adanya web server yang terhubung melalui jaringan internet, pengguna dapat memantau kondisi arus fasa, arus netral, arus bocor, tegangan, daya, energi, dan biaya secara jarak jauh melalui smartphone. Hal ini sejalan dengan konsep smart home yang semakin berkembang, di mana perangkat rumah tangga didesain cerdas dan adaptif terhadap kebutuhan pengguna. Efendi (2018)[11] menyatakan bahwa integrasi sistem monitoring berbasis IoT mampu meningkatkan efisiensi pengawasan perangkat listrik serta memberikan aksesibilitas tinggi kepada pengguna dalam pengelolaan energi.

Namun, terdapat beberapa keterbatasan pada sistem yang dikembangkan. Pertama, sistem hanya mengandalkan pembacaan selisih arus tanpa adanya filter harmonik atau deteksi noise listrik, yang dapat menyebabkan pembacaan arus bocor palsu (false positive) dalam kondisi tertentu. Kedua, pengujian sistem hanya dilakukan dalam waktu singkat dan dengan beban statis, sehingga belum mencerminkan performa dalam jangka panjang atau ketika digunakan pada beban non-linear seperti motor induksi. Ketiga, sistem sangat bergantung pada kestabilan koneksi internet untuk fungsi monitoring jarak jauh. Ketiadaan koneksi internet menyebabkan fitur IoT menjadi tidak aktif, dan pengguna hanya dapat melihat data melalui tampilan LCD lokal. Dari sisi kontribusi secara ilmiah, penelitian ini memberikan pendekatan inovatif dengan menggabungkan proteksi arus bocor dan monitoring energi dalam satu sistem terpadu. Berbeda dengan



penelitian sebelumnya oleh Rakasiwi et al. (2022) [5] yang hanya meneliti proteksi arus bocor, atau oleh Widyawarman & Hastono (2023) [3] yang hanya meneliti sistem monitoring energi, penelitian ini berhasil menggabungkan kedua fitur dalam satu unit sistem yang efisien, portabel, dan ekonomis. Dengan demikian, posisi penelitian ini menjadi signifikan dalam konteks pengembangan sistem perlindungan dan pengelolaan energi listrik rumah tangga berbasis teknologi cerdas.

Penelitian ini juga membuka peluang pengembangan lebih lanjut, seperti penambahan fitur auto reset, deteksi beban abnormal, atau pengiriman notifikasi secara langsung ke perangkat pengguna jika terjadi trip proteksi. Selain itu, penyempurnaan antarmuka web dan aplikasi mobile dapat memperluas fungsi monitoring.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini telah terbukti mampu memberikan proteksi terhadap risiko kebocoran arus serta mampu melakukan pemantauan konsumsi energi secara akurat dan efisien. Penelitian ini memberikan kontribusi praktis terhadap keamanan dan efisiensi energi listrik di tingkat rumah tangga serta memberikan dasar untuk penelitian lanjutan yang lebih kompleks di masa depan.

KESIMPULAN

Sistem proteksi arus bocor dan pemantauan energi listrik menggunakan sensor PZEM-004T ini telah selesai dan dapat bekerja sesuai dengan rancangan penulis. Dari pengujian yang telah dilakukan. Sistem proteksi arus bocor dan pemantauan konsumsi energi menggunakan sensor PZEM-004T telah berhasil bekerja dengan baik dan dapat mengirimkan data monitoring ke *web server*. Sensor PZEM-004T (1) yang digunakan untuk mendeteksi nilai arus I1 memiliki *error* 1,54%, sedangkan Sensor PZEM-004T (2) yang digunakan untuk mendeteksi nilai arus I2 memiliki rata-rata *error* 1,33%, maka kemudian sensor I2 memiliki rata-rata *error* lebih kecil dibandingkan dengan sensor I1.

Untuk sistem proteksi arus bocor menggunakan resistor sebagai pengganti tahanan tubuh manusia dalam pengujian dapat beroperasi dengan baik. Ketika terdapat perbedaan arus antara fasa dan netral melebihi 30mA sistem dapat mengaktifkan relay proteksi untuk memutus instalasi listrik. Untuk sistem pengukuran konsumsi energi listrik dengan sensor PZEM-004T bekerja dengan baik sistem dapat menghitung konsumsi energi dari tiap beban selama 30 menit. Sistem juga dapat memberikan estimasi biaya dari penggunaan beban dengan harga 1 Kwh Rp. 1.444,70 pada instalasi listrik golongan 900VA.

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, dengan mengucapkan syukur atas kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan nikmat Nya serta memberikan kelancaran serta kemudahan sehingga peneliti



dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik dan lancar. Semoga ilmu dan pengetahuan yang didapatkan saat mengerjakan tugas akhir dan selama masa perkuliahan dapat bermanfaat untuk diri sendiri dan orang lain. Perjalanan penulis dalam menyelesaikan penelitian tugas akhir ini tidak lepas dari bimbingan, masukan serta dukungan dari berbagai pihak. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya peneliti ucapkan pada kesempatan ini yaitu kepada :

1. Kepada pencipta dari segala yang ada, kepada Allah SWT yang telah memberikan penulis kelancaran, kemudahan, kekuatan, keberanian dalam hidup. Penulis sangat bersyukur atas segala rahmat dan nikmat yang telah Engkau berikan. Tiada kemudahan selagi Engkau mudahkan.
2. Kedua orang tua penulis, Ibu Suparwati dan Bapak Rahmadi Sigit Haryanto yang telah memberikan kasih sayang, nasihat, motivasi, memenuhi kebutuhan penulis, dukungan penulisan Tugas Akhir ini. Serta senantiasa memberi do'a dan dukungan materi maupun non materi kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Harapan yang senantiasa ada di setiap Doa yang penulis panjatkan "Semoga Allah SWT menyertai dan meridhoi bapak dan ibu di setiap urusan yang bapak ibu kerjakan serta menuntun anak-anak yang telah Tuhan titipkan".
3. Kepada bapak Umar, S.T., M.T., sebagai pembimbing Tugas Akhir ini yang selalu memberikan arahan dan semangat hingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Terima kasih kepada teman-teman kontrakan Ahmad, Cattur, Rozan, Ahmad, Khalid, Harry, dan Aziz yang telah memberikan arahan dan masukan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Kepada perempuan yang cantik, Shilva Elisa Shety seseorang yang telah hadir dalam hidup penulis, yang selalu memberikan *support*, semangat, dan senantiasa menemani penulis dalam menyusun Tugas Akhir ini hingga selesai. Terimakasih telah menjadi bagian dari tiap proses ku, terimakasih telah menjadi telinga atas segala keluh kesahku. Aku berdoa semoga perjalananmu kedepan akan selalu dimudahkan oleh Allah dan segala prosesmu melibatkanku.
6. Terima kasih kepada Asisten Laboratorium Teknik Elektro yang telah memberikan banyak pengalaman dan sebagai wadah pengembangan ilmu yang didapatkan di bangku perkuliahan.
7. Terakhir, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada satu sosok yang selama ini diam-diam berjuang tanpa henti, seorang laki-laki sederhana dengan impian yang tinggi, namun sering kali sulit ditebak isi pikiran dan hati. Terimakasih kepada penulis skripsi ini yaitu diriku sendiri, Hafizh Atsal Febriyanto. Anak sulung keluarga yang telah beranjak usia 23 tahun yang dikenal keras kepala namun



terkadang sifatnya seperti anak kecil. Terimakasih telah turut hadir di dunia ini, telah bertahan sejauh ini, dan terus berjuang berjalan melewati segala tantangan yang senantiasa semesta hadirkan. Terimakasih karena tetap berani menjadi dirimu sendiri. Penulis sangat bangga atas setiap langkah kecil yang kau ambil, keputusan yang telah kau lalui, atas semua pencapaian yang mungkin tak selalu dirayakan oranglain. Walau terkadang langkahmu tidak sesuai dengan apa yang semesta berikan, tetaplah belajar menerima dan mensyukuri atas apa yang telah kau lewati. Jangan pernah merasa lelah untuk berusaha, berbahagialah dimanapun kau berada. Rayakan atas segala yang ada dalam dirimu. Aku berdoa, semoga langkah dari kaki kecilmu selalu dikuatkan, dikelilingi oleh orang-orang yang hebat, serta kelak mimpimu satu persatu akan terjawab, Aamiin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Nugroho and R. A. Murdiantoro, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Arus Bocor Dan Daya Listrik Dengan NodeMCU ESP 8266 Pada Listrik Rumah Tangga," *J. Electron. Electr. Power Appl.*, 2023.
- [2] M. Nur Huda, Hartono, and Rifdian, "Prototype Kwh Meter Digital Prabayar Otomatis Menggunakan Wireless Berbasis IoT," *Semin. Nas. Inov. Teknol. Penerbangan*, vol. 8, no. 1, pp. 1–8, 2020.
- [3] D. Widyawarman and T. Hastono, "Sistem Monitoring Kwh Meter Digital Berbasis IoT pada Laboratorium Peralatan Medis," *J. online Phys.*, vol. 8, no. 3, pp. 80–86, 2023, doi: <https://doi.org/10.22437/jop.v8i3.26931>.
- [4] F. A. Pratama, K. B. Adam, and S. Sumaryo, "Real Time Data Logger Untuk Kwh Meter Digital Tiga Fasa Berbasis Internet of Things (Iot) Dan Cloud Storage," *Telkatika*, vol. 1, no. 1, p. 2021, 2021, [Online]. Available: <https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/telkatika/article/view/15182>
- [5] Z. M. Rakasiwi, D. Y. Tadeus, F. Mangkusasmito, and A. B. Putranto, "Identifikasi Dan Proteksi Kebocoran Arus Listrik Pada Rumah Tangga," *Berk. Fis.*, vol. 25, no. 3, pp. 94–104, 2022, [Online]. Available: https://ejournal.undip.ac.id/index.php/berkala_fisika/article/view/50739/0
- [6] P. E. Pambudi and S. Kristiyana, "Alat Penghindar Kecelakaan Akibat Sengatan Arus Listrik pada Instalasi Listrik Tegangan 220 Volt," in *Seminar ABDIMAS INDONESIA*, Yogyakarta: Ikatan Akuntan Indoneisa, 2021. [Online]. Available: <https://eprints.akprind.ac.id/id/eprint/747>
- [7] I. W. Sudiarta and I. K. Ta, "Analisis Penggunaan Saklar Arus Bocor (Elcb)



- Sebagai Proteksi Tegangan Sentuh Terhadap Manusia," *J. Log.*, vol. 14, no. 1, pp. 33–39, 2014.
- [8] A. Suryadi and A. S. Sofwan, "Rancang Bangun Modul Simulasi Elcb Fasa Satu Sebagai Pelindung Bagi Manusia," *Sinergi*, vol. 20, no. 1, p. 65, 2016, doi: 10.22441/sinergi.2016.1.009.
- [9] Persyaratan Umum Instalasi Listrik, "Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011)," *Dirjen Ketenagalistrikan*, vol. 2011, no. PUIL, pp. 1–133, 2011.
- [10] A. Azis, D. Irine, and K. Febrianti, "Analysis of the Overcurrent Protection System on the Cendana Extension of the Bungaran Substation in Palembang," *J. Ampere*, vol. 4, no. 2, pp. 332–344, 2019.
- [11] Y. Efendi, "Internet of Things (Iot) Sistem Pengendalian Lampu," *J. Ilm. ilmu Komput.*, vol. 4, no. 1, pp. 19–26, 2018.
- [12] Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Tarif Tenaga Listrik," *energi dan sumber daya Miner.*, no. 3, pp. 1–23, 2024.

